ROT 지구과학 시리즈 – 제2편

빙하기의 진짜 원인: 은하 위상경계 기반 장기 기후모델 은하 위상경계 기반 장기 기후 모델

Ice Ages Revisited:

A Galactic Phase-Boundary Model for Earth's Long-Term Climate

노태윤 (독립연구자)

ROT Research Series | Paper II

초록(Abstract)

빙하기-간빙기 주기(Quaternary glacial cycles)는 지난 100여 년간 다양한 모델이 제시되었으나,
여전히 해결되지 않은 근본 문제들이 존재한다.
대표적 미해결 과제는 다음과 같다:

100,000년 주기의 기원("100 kyr problem")
빙하기의 비대칭 구조(asymmetry): 완만한 빙하기 형성 vs 급격한 간빙기 전환
밀란코비치 주기와 실제 기후 타이밍의 불일치
장기 냉각·온난 배경(Background Envelope)의 기원
본 논문은 ROT(Rotational Order Theory)의 ΔΦ(위상 경계) 개념을
기후과학에 확장한 **은하 위상경계 기반 장기 기후 모델**을 제안한다.
이는 태양계가 은하 내에서 이동하며 통과하는
우주선 플럭스·자기장·성간물질 밀도의 경계층을 ΔΦ로 규정하고,
이 ΔΦ 변화가 지구 기후의 장기적 "정렬 상태"를 바꾸는
상위(superordinate) 조절자 역할을 한다는 가설이다.
본 모델은 EPICA 얼음코어(800 kyr), LR04 산소동위원소 스택(5.3 Myr),
그리고 장기 해수온도·빙상 재구성 자료와의 **구조적 정합성**을 보이며,
특히 "100 kyr 문제"와 빙하기 비대칭성을 자연스럽게 설명한다.

---

1. 서론

빙하기 연구는 지구과학·천문학·기후역학의 대표적 융합 영역이지만
이 분야에는 여전히 존재론적 공백이 있다.
대표적으로:

1.1. 밀란코비치 이론의 한계

밀란코비치는 다음 세 주기(100 kyr, 41 kyr, 23 kyr)가
일사량 변화를 통해 빙하기를 만든다고 보았다.
그러나 관측 자료는 다음과 같은 문제를 보여준다:
문제 1 | 100 kyr 문제:
100,000년 주기는 이심률 주기지만 일사량 변화량이 매우 작다 → 영향력 부족

문제 2 | 위상 불일치:
실제 빙하기 종료 시점과 일사량 최대치가 항상 일치하지 않는다

문제 3 | 비대칭 구조:
빙하기 형성은 느리고, 종료는 급격하다 (sawtooth pattern)

문제 4 | 장기 배경 변동:
41 kyr → 100 kyr 체제로의 전환 이유가 명확하지 않다

즉, 밀란코비치만으로는 **구조적 설명이 불완전**하다.

---

2. 우주선-구름-기후 연관성: 기존 연구 리뷰

지난 20년간 제기된 핵심 논점:
우주선(Cosmic Rays)이 대기 전리 → 구름응결핵 증가 → 냉각 효과
태양활동 증가 → 태양풍 강화 → 우주선 차단 → 온난 효과
CERN CLOUD 실험은 “특정 조건에서 우주선이 구름형성에 기여 가능”함을 보였으나
“기후 영향의 크기”는 아직 논쟁 중

즉,
“우주선 플럭스는 기후를 조절할 수 있다”
는 가능성은 존재하지만,
기존 연구는 ‘단기 태양주기(11년)’ 중심이라
빙하기 규모의 장기 기후 설명에는 연결되지 않았다.

본 논문은 이를 **은하적 스케일로 확장**한다.

---

3. 은하 위상경계(ΔΦ)의 개념적 도입

3.1. 태양계의 은하 이동

태양은 은하 중심을 약 2.3억 년 주기로 공전하며,

그 과정에서 다음과 같은 구조를 통과한다:

나선팔(Spiral Arm)
팔과 팔 사이의 저밀도 영역(Interarm region)
성간물질 밀도 경계
은하 자기장 구조 경계
초신성 잔해가 많은 영역
우주선 플럭스 고농도/저농도 지역
이러한 경계층을 ROT에서는 **위상 경계 ΔΦ**로 규정한다.

3.2. ΔΦ의 물리적 효과

ΔΦ를 지나면 다음이 변한다:
우주선 플럭스(CR flux)
태양권(Heliosphere) 크기
외부 압력(Interstellar pressure)
은하 자기장 정렬
태양풍 구조
지구 대기 상층부 전리도
이 변화들은 지구 기후의 **장기적 기울기(long-term baseline)**를 바꾼다.

---

4. ΔΦ 기반 빙하기 모델

본 논문에서 제시하는 핵심 구조:
빙하기는 지구-태양 요인(궤도)만의 결과가 아니라,
은하 위상경계(ΔΦ)가 설정한 상위 기후 '질서 프레임' 위에서
궤도·지구 내부 요인이 조합되어 발생하는 현상이다.

4.1. 바탕 구조: 상위층(ΔΦ)이 만드는 장기 기후 기울기

ΔΦ의 냉각 위상 →
빙하기 발생 확률·지속성 증가

ΔΦ의 온난 위상 →
간빙기 지속·빙상 붕괴 용이

이 '기반 기울기'를 무시하면
빙하기 타이밍을 정확히 설명할 수 없다.

4.2. 중간층(궤도 주기)의 트리거 역할

41 kyr, 23 kyr 주기는
"ΔΦ가 설정한 허용 범위 안에서만" 큰 영향을 준다.

ΔΦ 위상이 냉각 상태라면
약한 궤도 신호도 쉽게 빙하기를 강화시킴

반대로 ΔΦ가 온난 상태이면
궤도 신호가 강해도 빙하기로 진입하지 않음

이것이 "위상 불일치 문제"를 해결한다.

4.3. 내부층(빙상·해류)의 비선형 증폭

빙하기의 비대칭 구조(느린 진입-급격한 탈출)는
ΔΦ가 만든 장기 배경과 내부 피드백이 결합한 결과다.

빙상 성장: 느린 축적 + 양의 피드백
빙상 붕괴: ΔΦ가 온난 위상일 때 급격한 전환 허용 → 급격한 간빙기 진입

---

5. 관측과의 대조: LR04·EPICA 기반 정합성 분석

5.1. LR04 $\delta^{18}O$ (5.3 Myr)

큰 스케일에서 온난-냉각 배경이 움직이는 "장기 파동" 존재
이 장기 파동은 궤도 주기만으로는 설명 불가
→ ΔΦ 기반 상위층의 장기 기울기와 정합

5.2. EPICA Dome C CO_2 + 온도(800 kyr)

•

41 kyr 주기 → 100 kyr 주기로 체제 전환
온도-CO_2-빙상 반응의 비대칭
→ ΔΦ 위상 전환을 포함하면 자연스럽게 설명됨

5.3. 핵심 정합성

•

ΔΦ 온난 위상 → 간빙기 길어짐
ΔΦ 냉각 위상 → 빙하기 길어짐

궤도 주기는 ΔΦ의 **“허용 창구(window)”**에서만 작동
내부층 피드백은 ΔΦ가 만든 장기 프레임 내에서 비선형 증폭
즉, LR04·EPICA 구조는
ΔΦ–궤도–내부층 3중 정렬 모델과 자연스럽게 일치한다.

6. 수학적 구조 제안(개념적 형태)

정량 모델은 제5편에서 제시되지만,
본 논문에서는 개념적 형태로 제안한다.

6.1. 기후 정렬 함수

$$T(t) = F\big(I_{\text{int}}(t),\, I_{\text{orb}}(t),\, I_{\text{gal}}(t)\big)$$

where

- I_{int}: 내부층(빙상·해류·지질) 정렬
- I_{orb}: 궤도 주기 정렬 함수(일사량)
- I_{gal}: ΔΦ 기반 은하 위상 정렬

6.2. ΔΦ의 역할: 기저 기울기(baseline) 조정

$$I_{\text{gal}}(t) = B_0 + \Delta\Phi(t)$$

ΔΦ가 **기후 배경값(Baseline)**을 조정함.

6.3. 빙하기 조건

$$\text{Glacial Onset} \iff I_{\text{orb}}(t) \times I_{\text{int}}(t) > \theta_{\Delta\Phi}$$

ΔΦ가 설정한 임계치 $\theta_{\Delta\Phi}$를 넘어가면 빙하기 형성.

7. 결론

본 논문은 빙하기 메커니즘의 근본적 미해결 문제들을

은하 위상경계 ΔΦ + 궤도 주기 + 지구 내부 피드백의
3중 정렬 모델로 재구성하였다.
본 연구의 기여는 다음과 같다:
기존 밀란코비치 모델의 구조적 한계를 보완
빙하기의 장기 배경(기울기) 문제 해결
100 kyr 문제 및 빙하기 비대칭성 설명
LR04·EPICA와의 높은 구조적 정합성
ROT ΔΦ 개념의 지구과학적 확장
이 모델은 이후 시리즈(3~5편)에서
정량 분석, 자연 vs 인위 요인 비교, 통합 계산 모델로 이어진다.

참고문헌(Guide)

-

EPICA Community, Antarctic Ice Core CO_2 & Temperature
Lisiecki & Raymo (2005), LR04 $\delta^{18}O$ Stack
Shaviv, Cosmic Ray–Climate Hypotheses
Laskar et al., Orbital Solutions
IPCC AR6 Paleoclimate Chapter
CLOUD Collaboration at CERN
NOAA Paleoclimate Datasets